

ГИДРИД ГАФНИЯ HfH – ВОЗМОЖНЫЙ АНАЛОГ КАРБИДУ БОРА B₄C В СУЗ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Шакиров А. М.^[1], Стогов В.Ю.^[2]

Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента России Б.Н.

Ельцина, Екатеринбург, Россия^[1]

Акционерное общество «Государственный научный центр Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского», Обнинск, Россия^[2]

Anton.Shakirov@urfu.me^[1]

Аннотация. Рассмотрено потенциальное применение гидрида гафния HfH в качестве поглощающего материала в стержнях СУЗ быстрых реакторов взамен штатному карбиду бора B₄C. Была смоделирована ячейка активной зоны быстрого реактора. Обнаружено, что при равном количестве поглощающего материала в ячейке СУЗ физическая эффективность может с одной стороны сильно различаться, с другой быть эквивалентной между HfH и B₄C. Моделирование показало, что кольцевая форма поглощающего элемента обладает преимуществом в физической эффективности, по сравнению с цилиндрической формой. Приведено распределения потока нейтронов в поглощающем материале и его макросечения для рассмотрения принципиальной возможности использования HfH в быстрых реакторах. Предварительно прогнозируется потенциальный экономический эффект использования HfH в быстрых реакторах на примере БН-800.

Ключевые слова: регулирующий стержень, СУЗ, быстрый реактор, гидрид гафния HfH, карбид бора B₄C, ресурс стержней СУЗ.

HAFNIUM HYDRIDE HfH IS A POSSIBLE ANALOGUE OF BORON CARBIDE B₄C IN THE PROTECTION CONTROL SYSTEM OF FAST REACTORS

Shakirov A.M.^[1], Stogov V.Yu.^[2]

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,

Ekaterinburg, Russia^[1]

State Scientific Centre of the Russian Federation – Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Joint-Stock Company, Obninsk, Russia^[2]

Abstract. The potential use of hafnium hydride HfH as an absorbing material in the control rods of fast reactor instead of the standard boron carbide B₄C is considered. The cell of the fast reactor core was modeled. It was found that with an equal amount

of absorbing material in the cell, the physical efficiency can, on the one hand, vary greatly, and on the other hand, it can be equivalent between HfH and B₄C. The simulation showed that the annular shape of the absorbing element has an advantage in physical efficiency, compared with the cylindrical shape. The distribution of the neutron flux in the absorbing material and its macro-cross section are given to consider the fundamental possibility of using HfH in fast reactors. The potential economic effect of using HfH in fast reactors is previously predicted using the example of BN-800.

Key words: control rod, reactor control and protection system, fast reactor, hafnium hydride HfH, boron carbide B₄C, control rod lifetime.

Введение

Перспективным и инновационным направлением в ядерной энергетике является разработка стержней системы управления защиты (СУЗ) ядерного реактора с увеличенным ресурсом. Например, специалисты НИИАР (Научно-исследовательский институт атомных реакторов, г. Димитровград) связывают будущее развитие стержней СУЗ для инновационных реакторов на тепловых и промежуточных нейтронах с гафнатов диспрозия ($n\text{Dy}_2\text{O}_3m\text{HfO}_2$) [1]. Исследования, проведенные в Японии, указывают на возможность применения гидроксида гафния HfH в стержнях СУЗ быстрого реактора с натриевым теплоносителем JSFR (англ. Japan Sodium Fast Reactor) [2,3].

На сегодняшний день HfH рассматривается в качестве перспективного поглощающего материала в СУЗ инновационных быстрых реакторов. Связано это с увеличением ресурса из-за заметно меньших радиационных повреждений, по сравнению с B₄C, при хорошей способности к поглощению тепловых и быстрых нейтронов.

Абстрактное моделирование позволяет рассмотреть принципиальную возможность использования HfH в быстрых реакторах. Тем самым можно предварительно прогнозировать применимость HfH в перспективных российских быстрых реакторах. Поэтому строгой привязки к тому или иному реактору в данной работе нет. Целью работы является выявление общих закономерностей при использовании HfH в СУЗ быстрых реакторов.

Недостатки карбида бора B₄C

B₄C, являясь (n,α)-поглотителем, подвержен большим радиационным повреждениям, чем (n,γ)-поглотитель, такой как HfH. Реакция типа $\text{B}^{10}(\text{n},\alpha)\text{Li}^7$ сопровождается выходом α-частиц и их скоплением в газ гелия. Газ гелия приводит к набуханию поглощающего элемента (пэла) и к нежелательному силовому воздействию на оболочку пэла со стороны частиц карбида бора. Выгорание B¹⁰ ведет к накоплению «прозрачного» изотопа Li⁷ с малым сечением

захвата 0.033 барн. Его накопление приводит к снижению физической эффективности стержней СУЗ из В₄С.

Для уменьшения деструктивного воздействия поглотителя с оболочкой применяются конструкторские модификации. Следует ожидать, что из-за больших радиационных повреждений карбида бора, прежде всего распухания до 30-40% при выгорании 40-50% В¹⁰, максимальные ресурсные возможности не будут превышать 900-1000 эффективных суток (эфф. сут. – время работы в сутках реактора на 100% мощности) [4].

Преимущества гидрида гафния HfH

Гафнию Hf присуща высокая поглощающая способность, и он может рассматриваться в качестве материала пэлов СУЗ. При этом, гафний имеет семь сильных резонансов в интервале от 1 до 7 эВ [5]. Использование Hf вместе с хорошим замедлителем, например, с водородом, позволяет HfH_x (где x= 1.0-1.5) оказаться отличным поглотителем даже в быстрых реакторах.

Захват теплового нейтрона происходит по типу: $Hf^A(n,\gamma)Hf^{A+1}$. Цепочка таких реакций исключает образование газа гелия. На **Рис. 2** изображена подробная схема последовательных захватов нейтрона Hf. Изотопы Hf и продукты распада - лутеций и тантал обладают хорошими сечениями захвата тепловых нейтронов. [6].

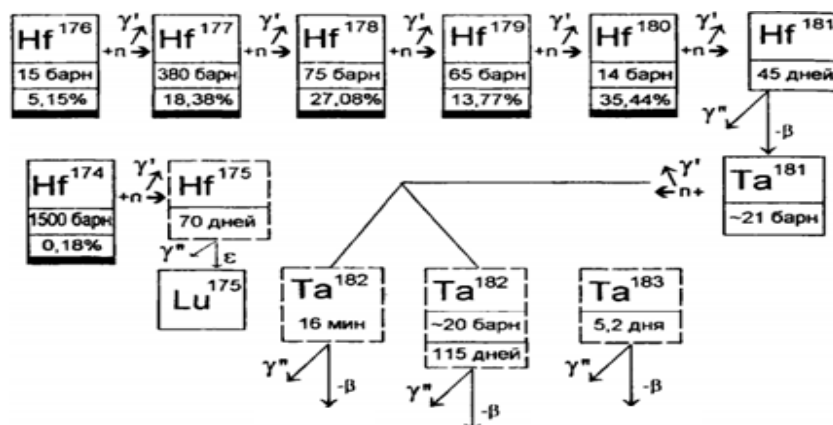


Рисунок 2 – Схема изотопных превращений Hf и дальнейших бета-распадов (тепловая область энергий)

Эти факторы обеспечивают слабое снижение физической эффективности пэлов СУЗ на основе гафния в процессе их эксплуатации в реакторе. Предварительно оценивается, что ресурс HfH_x окажется в 2-3 раза больше В₄С.

Расчетная модель

За основу расчетной модели взята область зоны малого обогащения реактора БН-800 **Рис. 3**. Сама модель представляет собой двухзонную гетерогенную структуру из двух концентрических шестиугольных призм **Рис. 4**.

Внутренняя призма моделирует ячейку СУЗ, а внешняя – окружающие топливные сборки. Геометрические характеристики ячейки были выбраны, руководствуясь [7]. Не вдаваясь в конструкторские подробности реактора, расчеты на такой модели позволяют рассмотреть принципиальные закономерности использования НfН в быстром реакторе.

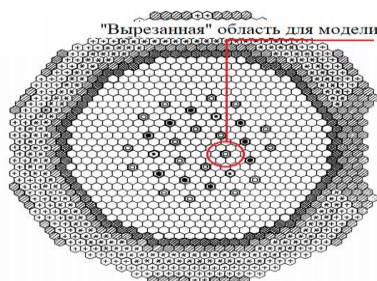


Рисунок 3 – Моделируемая область БН-800.

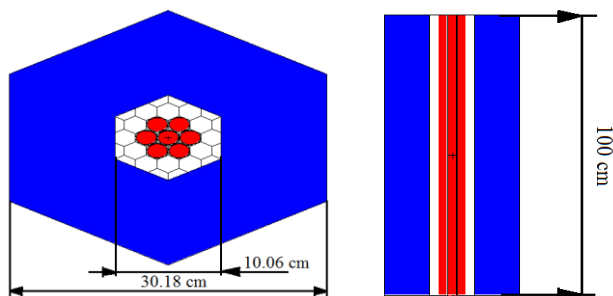


Рисунок 4 – Поперечное и продольное сечения построенной модели.

Результаты моделирования

Сравнение физической эффективности V_4C и HfN_x является одним из ключевых вопросов при рассмотрении HfN_x на потенциальное замещение на V_4C . При небольшой загрузке HfN_x в ячейку эффективность гидроксида намного меньше, чем V_4C , даже при небольшом обогащении по В-10. С другой стороны, по мере заполнения ячейки поглотителем разность между эффективностью HfN и V_4C уменьшается. Можно добиться того, что эффективности V_4C и HfN окажутся практически одинаковыми при их одинаковой загрузке в ячейку СУЗ, вплоть до того, что HfN окажется эффективнее, чем V_4C **Рис. 5.**

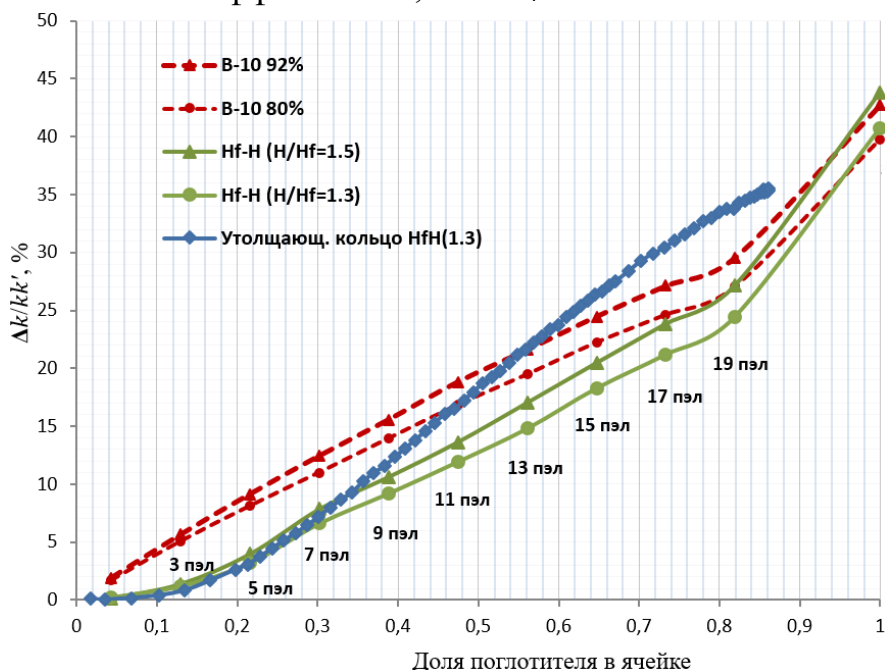


Рисунок 5 – Кривые эффективности для V_4C и HfN_x

Ситуация с физической эффективностью сильно отличается при использовании пэла кольцевой формы. Так, кольцевой поглотитель из $\text{HfN}_{1.3}$ показывает лучший рост. При заполнении на 0.6 ячейки физическая эффективность становится эквивалентной сильно обогащенному бору B_4C (92% по В-10).

Распределение макросечения и потока нейтронов в кольце

При прохождении нейтронами кольца из поглотителя основная часть нейтронов успевает замедлиться в приповерхностном слое за счет водорода. Макросечение захвата достигает максимума внутри слоя порядка 5-7 см, **Рис. 6**. Факт убыли числа нейтронов отражен на **Рис. 7**. Отсюда видно, что поток нейтронов сильно ослабляется на толщине в 5-7 см. Исходя из Рис. 6 и Рис. 7 можно сделать вывод о том, что эффективная толщина кольца составляет около 10 см.

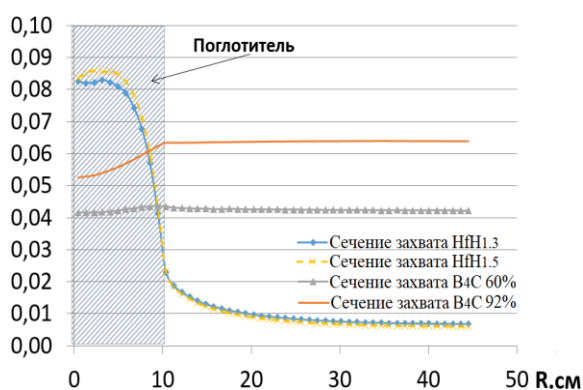


Рисунок 6 – Распределение макросечения захвата в поглотителе, см^{-1}

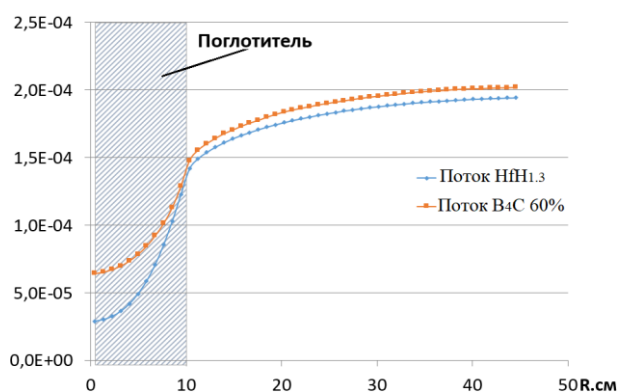


Рисунок 7 – Поток нейтронов около и внутри поглотителя, $\text{частиц/см}^2 \text{ с} * 10^{24}$

Потенциальный экономический эффект использования HfN в быстрых реакторах

При использовании (n, γ) -поглотителей стоимость пэлов ОР (органов регулирования) СУЗ несколько возрастет. Однако, это повышение стоимости изделий заведомо компенсируется в случае увеличения их срока. Вследствие уменьшения требуемого количества ОР СУЗ на всю кампанию реактора снизятся также затраты на последующее обращение с отработавшими изделиями. По предварительным расчетам сокращение расходов на ОР СУЗ для быстрого реактора БН-800 в долгосрочной перспективе на 20 лет составит около 60% **Рис. 8**. Предусмотрено использование 30 стержней СУЗ в БН-800, включая стержни АЗ и КС, в рамках топливной кампании. За 20 лет предполагается использовать порядка 300 стержней B_4C , в то время как стержней из HfN потребуется только 120.

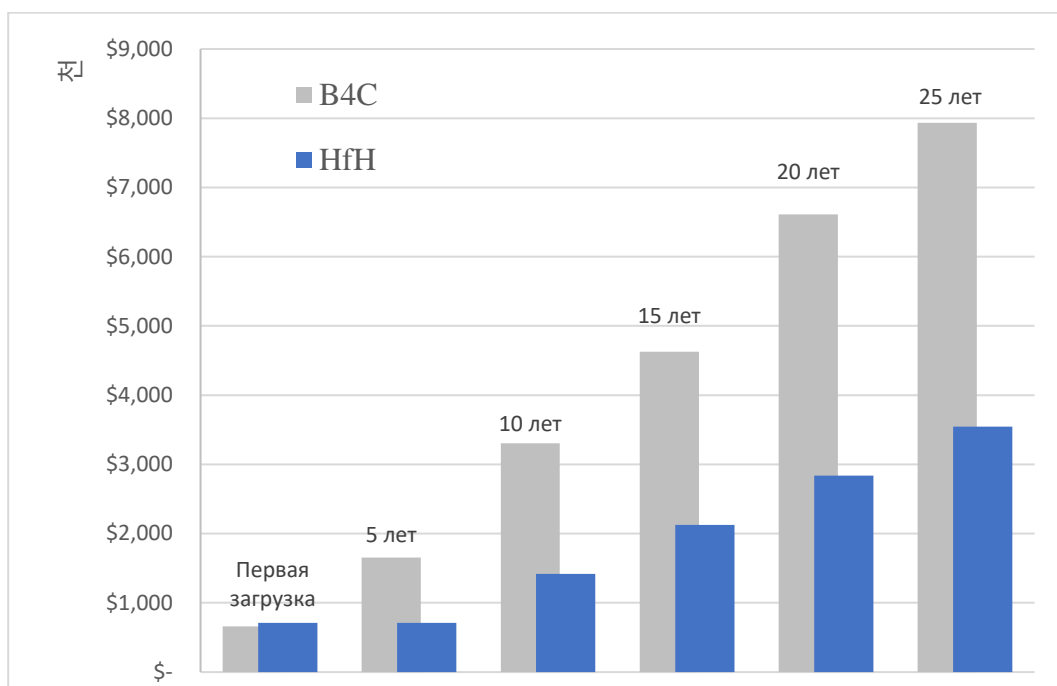


Рисунок 8 – Оценочные затраты на ОР СУЗ БН-800.

Выводы

В рамках исследования была выявлена принципиальная возможность использования HfH в быстрых реакторах. HfH не только эквивалентен, но и эффективнее B_4C , при росте количества поглотителя. Расчеты показали, что кольцевая форма поглощающего элемента позволяет добиться наилучшей физической эффективности в быстром реакторе. Предварительные оценки экономической составляющей вопроса позволяют прогнозировать снижение затрат на 60% на примере БН-800 не только за счет уменьшения требуемого количества стержней СУЗ, но и за счет сокращения затрат на обращение с отработанными изделиями.

Библиографический список

1. В. Д. Рисованный, А.В. Захаров, Т.М. Гусева, [др]. Опыт исследования поглощающих материалов и стержней регулирования реактора бор-60 и перспективы его использования в инновационных реакторах на быстрых нейтронах // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР, No. 1, 2010. ст. 15-26
2. Kazumi Ikeda, Hiroyuki Moriwaki, Yoshiyuki Ohkubo, Tomohiko Iwasaki, Kenji Konashi. Application of hafnium hydride control rod to large sodium cooled fast breeder reactor // Nuclear Engineering and Design, 2014. pp. 97-107.
3. Tomohiko Iwasaki, Kenji Konashi. Development of Hydride Absorber for Fast Reactor - Application of Hafnium Hydride to Control Rod of Large Fast Reactor - // Journal of Nuclear Science and Technology, 2012. pp. 874-882.

4. В.Д. Рисованный А.В. Захаров, Е.П. Ключков. Поглощающие материалы и стержни СУЗ инновационных ядерных реакторов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2011. No. 1. ст. 240-248.
5. А.А. Афанасьев, Ю.Ф. Конотоп, Н.П. Одейчук. Гафний - перспективный поглотитель для пэлов СУЗ // Вопросы атомной науки и техники. 2000. No.
6. А.В. Ефимов, В.М. Ажажа, Н.Н. Пилипенко, А.П. Мухачев. Гафний - перспективный материал для ядерной энергетики. // "Вестник Харьковского политехнического института". 2004. No. 23. ст. 37-44.
7. IAEA - International Atomic Energy Agency. The fourth Research Co-ordination Meeting (RCM). IPPE, Obninsk: IAEA, 2003.